

Les grandes installations astronomiques : leur importance fondamentale pour les astronomes suisses

Editeur

Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT)
Platform Mathematics, Astronomy and Physics (MAP)
Maison des Académies | Laupenstrasse 7 | Case postale | 3001 Berne

Un projet de la Platform Mathematics, Astronomy and Physics (MAP)

map@scnat.ch, www.sciencesnaturelles.ch/organisations/map

Auteurs

Michael Meyer, EPF de Zurich; Georges Meylan, EPF de Lausanne; Georges Meynet, Université de Genève;
Alexandre Refregier, EPF de Zurich; Friedrich-Karl Thielemann, Université de Bâle

Rédaction

Olivier Dessibourg, journaliste scientifique

Collaboration rédactionnelle

Christian Preiswerk, Platform MAP

Traduction

Zieltext AG, Zollikon

Review Version française

Georges Meylan, Georges Meynet

Layout

Olivia Zwygart

Image de couverture

D. Kordan/ESO

Impression

Ackermanndruck AG, Köniz

1^{re} édition, 2017 (700 ex. en français/1900 ex. en allemand/400 ex. en anglais)

Le brochure peut être commandé gratuitement auprès de la Platform MAP
ou téléchargée à l'adresse www.sciencesnaturelles.ch/organisations/map.

© Académies suisses des sciences, 2017

Proposition de citation

Les grandes installations astronomiques:
leur importance fondamentale pour les astronomes suisses.
Swiss Academies Communications 12 (7)

ISSN (print) 2297-1815

ISSN (online) 2297-1823

DOI: 10.5281/zenodo.1067988

Les grandes installations astronomiques: leur importance fondamentale pour les astronomes suisses

sc | nat 

Swiss Academy of Sciences
Akademie der Naturwissenschaften
Accademia di scienze naturali
Académie des sciences naturelles

Contenu

1. Introduction	6
2. Les étoiles et les planètes.....	8
2.1 Formation.....	8
2.2 Evolution stellaire.....	11
2.3 Mort et explosion des étoiles.....	13
3. Les galaxies.....	16
3.1 Formation et évolution.....	16
4. L'Univers.....	18
4.1 Le fond diffus cosmologique.....	18
4.2 Tests de gravitation et ondes gravitationnelles.....	19
4.3 Exploration des Grandes Structures.....	20
4.4 Square Kilometer Array.....	21
5. Liens avec des champs de recherche adjacents.....	22
6. Conclusions.....	23
Annexe	24

Le Very Large Telescope (VLT) de l'ESO durant des essais du nouveau laser pour le Laser Guide Star Facility. Ce system permet de corriger la plupart des perturbations causées par le mouvement constant de l'atmosphère dans le but de prendre des images beaucoup plus nettes. Crédit: ESO/Y. Beletsky



Photo aérienne de la demeure du Very Large Telescope (VLT) de l'ESO sur le Mont Paranal au Chili. L'observatoire de Paranal avec ses quatre télescopes géant de 8,2 mètres se trouve à une altitude de 2600 mètres, en arrière-plan, on peut voir le sommet enneigé de 6720 mètres d'altitude du volcan Llullaillaco, situé à une distance de 190 km. Crédit: ESO/G.Hüdepohl (atacamaphoto.com)

Au cours de ces deux dernières décennies, l'astrophysique et la cosmologie ont connu un Âge d'or à la suite d'avancées théoriques et observationnelles dans tous les domaines de la recherche. Les astronomes suisses ont apporté des contributions substantielles à ces champs d'études grâce à la disponibilité d'un grand nombre d'installations modernes aux quatre coins du monde. Sans un accès régulier à ces installations et en l'absence de collaborations internationales, la recherche astronomique telle qu'elle se présente aujourd'hui serait inconcevable. La présente fiche technique a pour vocation de mettre en lumière leur impact et leur importance pour les chercheurs suisses. Tous les projets actuels et futurs sont présentés plus en détail dans la Feuille de route suisse pour l'astronomie (« Swiss Roadmap for Astronomy ») et ses mises à jour.¹

¹ www.naturalsciences.ch/service/publications/47646-update-to-the-roadmap-for-astronomy-in-switzerland-2007---2016.

1. Introduction

En 1995, Michel Mayor et Didier Queloz, de l'université de Genève, ont fait œuvre de pionnier en découvrant la première planète en orbite autour d'un autre soleil – ce qu'on appelle une *planète extrasolaire*. Cette découverte a donné le coup d'envoi à une multitude d'activités observationnelles et théoriques consacrées à ces *exoplanètes*. Leur habitabilité potentielle par des formes de vie même élémentaires revêt un intérêt fondamental.

Au fil de deux décennies, la *cosmologie* a connu également de formidables évolutions, pour ne pas dire des révolutions. L'un des progrès les plus fondamentaux est dû aux observations du fond diffus cosmologique (« Cosmic Microwave Background » ou CMB), la première lumière émise environ 380 000 années après le Big Bang, qui renferme des informations détaillées sur le passé lointain. En raison de l'expansion de l'Univers, la température de ce rayonnement électromagnétique est passée d'une valeur très élevée à l'origine à une valeur très basse aujourd'hui (2,725 kelvins, soit $-270,4^{\circ}$ Celsius). Ses faibles variations spatiales théoriquement prédites ainsi que ses mesures au moyen de trois satellites successifs (COBE, WMAP, Planck) permettent d'affiner les modèles cosmologiques beaucoup mieux que jamais auparavant.

Les grandes interrogations concernent le lien entre la naissance de l'Univers et la formation actuelle de nouvelles planètes. Ces dernières se forment à partir du disque de gaz et de poussières en rotation qui entoure un objet central très chaud (une étoile), lequel résulte de la contraction de nuages de gaz froids. *Les étoiles évoluent* avec le temps selon un processus continu : elles brûlent les éléments (chimiques) légers, les transforment ainsi en éléments plus lourds avec production de chaleur et de lumière, et achèvent leur vie dans de gigantesques explosions qui éjectent des matériaux contenant tous les éléments nouveaux produits. Le sort final des étoiles ainsi que la composition de leurs éjectas constituent le fondement de notre connaissance de l'évolution et la base de la composition actuelle de *notre Galaxie (la Voie lactée)* et de la *grande diversité de galaxies observées*.

Ces études ont démontré dès leurs phases initiales que les masses de matière contenues dans les étoiles et le gaz du milieu interstellaire ne suffisaient pas visiblement à expliquer les processus à l'œuvre. Le postulat de l'existence d'une entité invisible supplémentaire, appelée *matière noire ou sombre*, a été posé dès 1933 par l'astronome suisse Fritz Zwicky. Aujourd'hui, notre Univers s'avère

constitué de 5% de matière commune (p. ex. atomes exerçant une attraction gravitationnelle), de 26% de *matière sombre* (exerçant une attraction gravitationnelle, mais de nature inconnue) et de 69% d'*énergie sombre* (exerçant une force de répulsion gravitationnelle, là aussi de nature inconnue). Cette énergie sombre est liée à une autre observation majeure, dont la cause demeure inexplicée, effectuée en 1998 : l'accélération inattendue de l'*expansion de l'Univers*.

L'ensemble des avancées observationnelles et théoriques constitue jusqu'à présent le *modèle standard de la cosmologie du Big Bang*, à savoir le modèle le plus simple apte à fournir un compte rendu de qualité raisonnable de toutes les propriétés du cosmos observées par l'Homme. La soif de réponses aux questions qui subsistent – qu'il s'agisse de la vie sur les exoplanètes ou de la nature des composants de la matière sombre de l'Univers – exige des observations à la fois d'étoiles et de planètes proches et faiblement lumineuses et de galaxies très éloignées mais plus lumineuses. Ces observations nécessitent des *installations astronomiques de technologie avancée* dans tous les segments (ou bandes de longueurs d'onde) du spectre électromagnétique. Malheureusement, l'atmosphère terrestre ne permet qu'à certaines longueurs d'onde d'atteindre le sol (Fig. 1).

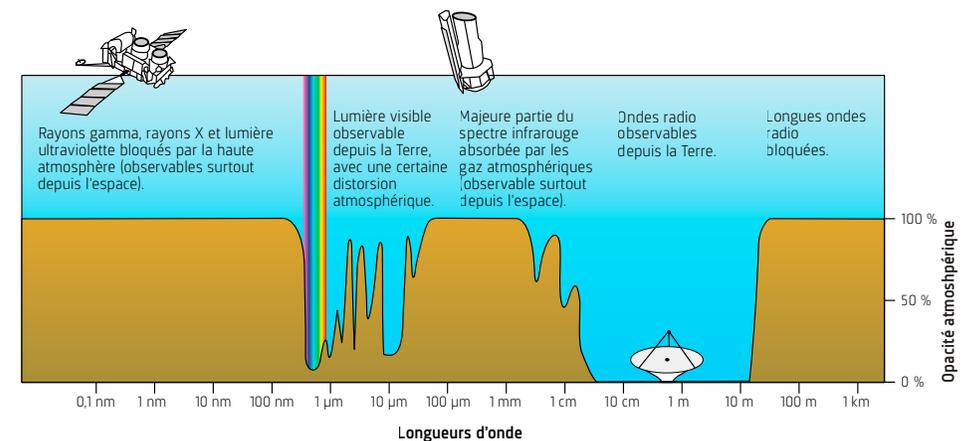


Fig. 1: La plupart des longueurs d'onde (spectre) de la lumière n'atteignent jamais la Terre : elles sont absorbées par notre atmosphère. Les télescopes spatiaux placés au-dessus de notre atmosphère sont capables de les observer. Les longueurs d'onde visibles et la plupart des longueurs d'onde radio (la « fenêtré optique », c'est-à-dire la lumière visible et la « fenêtré radio ») atteignent la surface de la Terre et peuvent être observées par les télescopes au sol. Une quantité restreinte de lumière infrarouge (IR) et ultraviolette (UV) atteignent également la surface de la Terre. Source : NASA/Wikimedia Commons

Ainsi, nous avons besoin, simultanément, de *télescopes au sol* et de *satellites*, ces derniers n'étant pas affectés par l'absorption de lumière dans l'atmosphère terrestre. La Suisse étant membre à part entière de l'Agence spatiale européenne (ESA) et de l'Observatoire européen austral (ESO), ses scientifiques ont un accès direct aux satellites² de la première et aux télescopes au sol³ du second. Ces deux organismes jouent un rôle essentiel dans la *très haute qualité de la recherche astronomique et cosmologique en Suisse*. De surcroît, un grand nombre de projets dans tous les domaines sont planifiés pour un lancement prochain ou sont d'ores et déjà déployés.

2. Les étoiles et les planètes

2.1 Formation

Les étoiles et les planètes qui les entourent se forment à partir de la contraction de nuages de gaz et de poussières. Au fur et à mesure que les matériaux s'accumulent, les « *protoétoiles* » sont dans un premier temps très froides et fortement obscurcies par d'immenses quantités de débris de taille minuscule. Afin d'observer le déroulement de ces processus, la capacité de perception des longueurs d'ondes millimétriques est nécessaire. Le télescope spatial **Herschel** de l'ESA offre non seulement une réponse à cette exigence de sensibilité, mais aussi un accès spectroscopique aux nouvelles molécules cruciales pour comprendre le bilan énergétique du milieu interstellaire, de même que la chimie organique susceptible d'aboutir à des molécules prébiotiques.

La formation des étoiles et des planètes peut également être observée à l'aide d'instruments installés sur le **Very Large Telescope (VLT)** de l'ESO, au Chili. La Suisse a joué un rôle majeur dans le développement d'un grand nombre de ces instruments. La construction du spectrographe **ESPRESSO** est placée sous la responsabilité d'astronomes suisses. Il remplace son prédécesseur de fabrication suisse **HARPS**, qui fut longtemps le plus puissant appareil d'exploration des planètes, fondé sur la *technique des vitesses radiales*. Cette méthode mesure l'oscillation de l'étoile hôte en réaction à l'influence gravitationnelle de n'importe quelle exoplanète environnante; la première fut ainsi découverte en 1995.



Fig. 2: En 2012, les astronomes suisses ont découvert une planète dont la masse équivaut à peu près à celle de la Terre et qui tourne en orbite autour d'une étoile du système Alpha Centauri (Alpha Centauri B), le plus proche de la Terre. Il s'agit par ailleurs de l'exoplanète la plus légère jamais découverte autour d'une étoile comme le Soleil. La planète a été détectée à l'aide de l'instrument HARPS sur le télescope de 3,6 mètres de diamètre de l'observatoire de l'ESO de La Silla, au Chili. Crédit: ESO

La Suisse a également codéveloppé le **Next Generation Transit Survey (NGTS)** à l'observatoire du Cerro Paranal de l'ESO, au Chili, dont le but est d'étudier l'obscurcissement de la lumière due au passage (transit) d'une planète devant son étoile, tel qu'on peut l'observer depuis la Terre. Le télescope spatial **CHEOPS** développé par la Suisse sur la base de cette technique pour assurer le suivi des découvertes issues du HARPS et du NGTS, est la première mission de classe S (Small) de l'ESA. Ce satellite, dont le lancement est prévu en 2018, sera capable de détecter les planètes de type terrestre gravitant autour d'étoiles sélectionnées et d'analyser la diversité de composition de planètes plus petites qu'Uranus et Neptune. Point d'orgue de ces études, l'observatoire spatial **PLATO** de l'ESA dont le lancement est prévu en 2024, sera capable de détecter des planètes de la taille de la Terre (Fig. 2), y compris celles situées à des distances orbitales de leurs étoiles hôtes respectives, permettant à leur surface d'abriter de l'eau sous forme liquide, voire de favoriser le développement de la vie.

La recherche scientifique planétaire suisse tire également profit de sa participation dans les missions d'exploration du système solaire menées par l'ESA. Entre 2014 et 2016, l'engin spatial **Rosetta** a fourni des images à couper le souffle de la

² www.esa.int/spaceinimages/Images/2013/02/ESA_Fleet_Across_Spectrum_poster_2013

³ www.eso.org/public/teles-instr

comète 67P/TG (Fig. 3); le spectromètre de masse et les caméras embarquées, mis au point par des chercheurs suisses, ont permis de lever un coin du voile sur la composition de ce corps céleste. La Suisse est également impliquée au travers de la fourniture de caméras dans la mission de la sonde **ExoMars orbiter**, qui tourne en orbite autour de la Planète rouge depuis 2016, et participera aux missions à venir, parmi lesquelles celle du rover **ExoMars 2020** et du satellite **JUICE**. Prévu pour un lancement en 2020, ce dernier projet étudiera les lunes de Jupiter, qu'elle devrait atteindre en 2030.

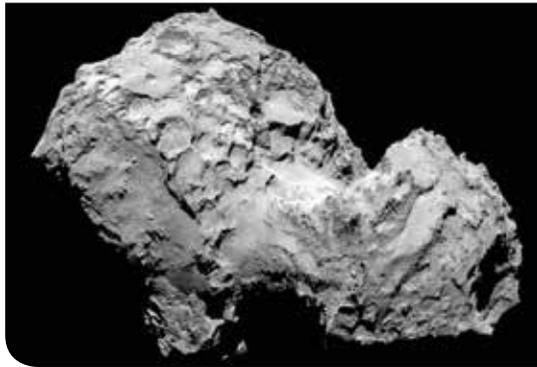


Fig. 3: La comète 67P/Tchourioumov-Guérassimenko photographiée par Rosetta. Credit: ESA

En 2018, la NASA, l'ESA et l'Agence spatiale canadienne vont lancer le **James Webb Space Telescope (JWST)** qui livrera des images d'une résolution et d'une sensibilité inédites, depuis la lumière visible à grande longueur d'onde jusqu'à l'infrarouge (longueurs d'onde de 0,6 à 27 micromètres), ainsi que des renseignements sur la composition des planètes autour des étoiles et des observations des événements les plus lointains de l'Univers. La Suisse est membre du consortium européen qui a développé le **MIRI** (Mid InfraRed Instrument), un instrument puissant qui équipe le **JWST**.

Le coup d'envoi de la construction du **Extremely Large Telescope (ELT)** de l'ESO vient d'être lancé. Avec son miroir de 39 m de diamètre, il sera le plus grand télescope terrestre au monde (Fig. 4) et constituera une installation de tous les records pour les décennies à venir. La première lumière du ELT est prévue pour 2024. Les astronomes suisses prévoient de participer au développement d'instruments destinés à cette plate-forme. Cette dernière sera en mesure de caractériser par spectroscopie les planètes d'une taille approchant celle de la Terre, peut-être le cœur même de leurs zones habitables, autour de la poignée d'étoiles les plus proches. Le ELT permettra de surcroît d'étudier les galaxies les plus lointaines.

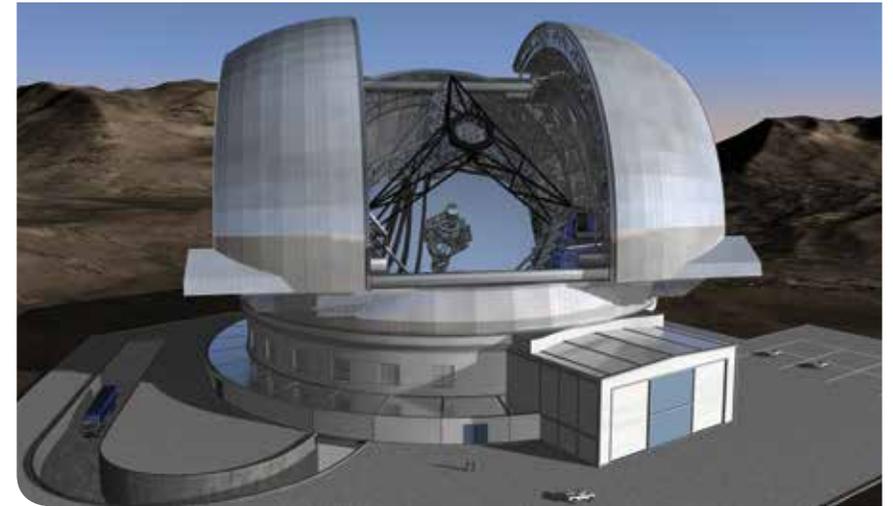


Fig. 4: Le Extremely Large Telescope (ELT) de l'ESO, avec ses 39 m de diamètre, sera le plus grand télescope optique/proche-infrarouge du monde et collectera 16 fois plus de lumière que les plus grands télescopes optiques actuellement en service. Il sera capable de compenser les distorsions atmosphériques et de fournir ainsi des images 16 fois plus précises que celles du télescope spatial Hubble. L'ELT permettra de réaliser des études détaillées des planètes gravitant autour d'autres étoiles, les premières galaxies de l'Univers, les trous noir supermassifs et la nature du secteur sombre de l'Univers. Credit: ESO

2.2 Evolution stellaire

L'évolution des étoiles, depuis leur naissance jusqu'à leur explosion, constitue un champ de recherche très intense en Suisse. Les étoiles peuvent être utilisées dans le cadre de nombreuses applications, depuis leur fonction d'horloge indiquant l'âge des galaxies jusqu'à leur rôle de laboratoires cosmiques pour l'exploration de la physique de particules élusives appelées *neutrinos* ou de l'évolution des *constantes fondamentales* au cours de l'histoire de l'Univers.

A propos de physique: les étoiles sont des objets très complexes au cœur desquels les *forces fondamentales de la Nature* (gravitation, force électromagnétique, interactions nucléaires faibles et fortes) interagissent au travers d'un grand nombre de processus. A cet égard, elles permettent d'explorer des processus à l'œuvre bien au-delà des plages de températures et de densités qui peuvent être étudiées dans les laboratoires au sol, et d'étudier la physique aux frontières de nos connaissances actuelles. Aussi, la construction de modèles fiables et détaillés

pour la prédiction de l'évolution des étoiles sur la base de principes physiques ab-initio est un impératif crucial. De nouvelles observations, bientôt rendues possibles, sont nécessaires pour réaliser de tels tests.

Afin d'évaluer l'activité de notre étoile, le Soleil, via ses *émissions de particules*, appelées *vent solaire* et ses incidences potentielles sur la *météo de l'espace*, des satellites de surveillance sont nécessaires ; la Suisse participe à plusieurs missions au travers de deux projets actuellement en construction : **NORSAT-1** et **PROBA-3**. Un grand pas vers une meilleure compréhension de notre Soleil sera réalisé avec la mission **Solar Orbiter** de l'ESA, dont le coup d'envoi est prévu en 2018 et à laquelle sont associés deux instituts suisses.

Grâce à l'*astérosismologie*, il est possible d'explorer l'activité à l'intérieur des étoiles. Cette technique consiste à observer les oscillations à la surface des étoiles et d'en déduire la physique du cœur des étoiles à partir des propriétés de ces « tremblements d'étoile ». La méthode a été utilisée avec succès sur le Soleil. Elle peut dorénavant être appliquée à d'autres étoiles grâce à des instruments comme le satellite européen **CoRoT** (2006 à 2013) et son cousin américain **Kepler**, en activité depuis 2009. Ces deux satellites permettent en particulier d'étudier la physique et l'histoire des étoiles géantes rouges de la Voie lactée. L'astérosismologie permet également d'affiner les mesures de la masse et du rayon des étoiles avec une précision inégalée jusque-là et constitue donc une aide précieuse pour la caractérisation des planètes qui les entourent.

L'*interférométrie* consiste à diriger un grand nombre de télescopes sur le même objet simultanément, puis de combiner la lumière collectée. Un instrument de ce type est le **Very Large Telescope Interferometer (VLTI)** de l'ESO, situé à l'observatoire du Cerro Paranal, au Chili. Grâce à lui, il est aujourd'hui possible d'observer la surface d'autres étoiles que le Soleil avec, à la clé, un exemple de découverte d'objets de la forme d'un ballon de rugby, signe de leurs rotations très rapides.

Parmi les installations actuelles porteuses de répercussions énormes sur la physique des étoiles, le projet **GAIA** de l'ESA est en première ligne (Fig. 5). Ce satellite lancé à la fin de l'année 2013 va permettre l'observation d'un milliard d'objets astronomiques sur une période de cinq ans, principalement des étoiles (à peu près 1% de la population stellaire de la Voie lactée). Les résultats serviront à dresser une carte 3D de notre Galaxie, qui montrera combien notre Galaxie reste à ce jour aussi fascinante qu'inconnue, et sera utilisée abondamment par les astronomes suisses.

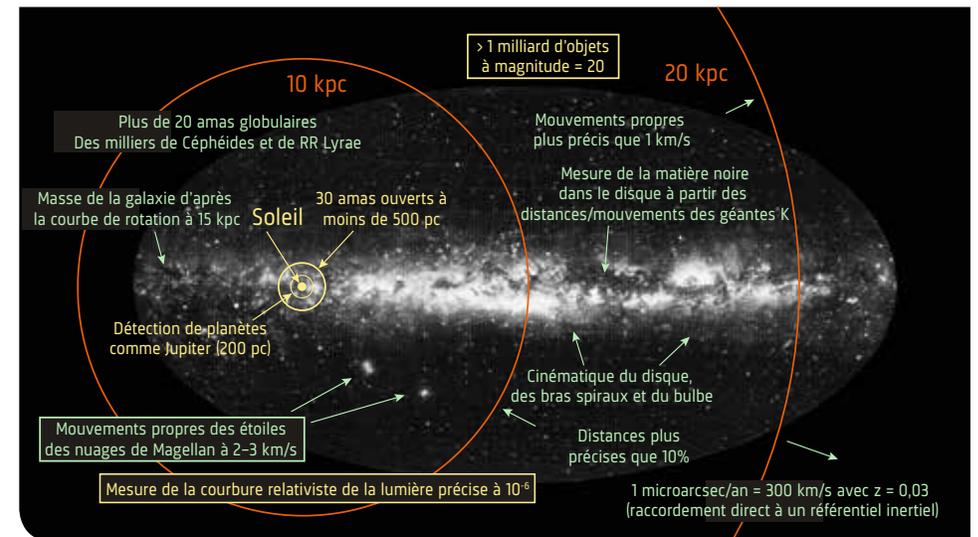


Fig. 5: Illustration de la portée d'observation de Gaia et contribution attendue à nos connaissances de la Galaxie. (1 kpc = 3262 années lumières = 31×10^{15} km). Copyright: ESA/Lund Observatory

Au cours de leur évolution, toutes les étoiles émettent une lumière comportant une *signature distinctive des éléments chimiques* du nuage interstellaire originel à partir duquel elles se sont formées. Ainsi, depuis les vieilles étoiles nées aux tout premiers instants de l'évolution de la Voie lactée jusqu'aux étoiles les plus récentes, les scientifiques tirent des enseignements sur la composition gazeuse de notre Galaxie tout au long de son développement. De telles observations sont réalisées notamment à l'aide du VLT, du **télescope spatial Hubble** de la NASA/ESA et du satellite **GAIA** de l'ESA.

2.3 Mort et explosion des étoiles

La fin de vie des étoiles revêt un intérêt considérable pour les scientifiques suisses. Elle est déterminée principalement par la masse originelle de l'objet (Fig. 6). Les étoiles pesant moins de huit masses solaires achèvent leur évolution sous la forme de *naines blanches* : après la combustion de l'hydrogène et l'hélium contenus en leur sein (et leur transformation en *géantes rouges* dans un premier temps), leur enveloppe extérieure est lentement emportée par le souffle du vent stellaire, provoquant la formation d'une nébuleuse planétaire. Certaines *nébu-*

leuses planétaires peuvent être observées à travers un simple télescope au sol. Leur cœur, supporté par la pression quantique d'un gaz d'électrons dense et froid, demeure intact. Une naine blanche typique possède une masse à peu égale à celle du Soleil, mais reste légèrement plus grosse que la Terre.

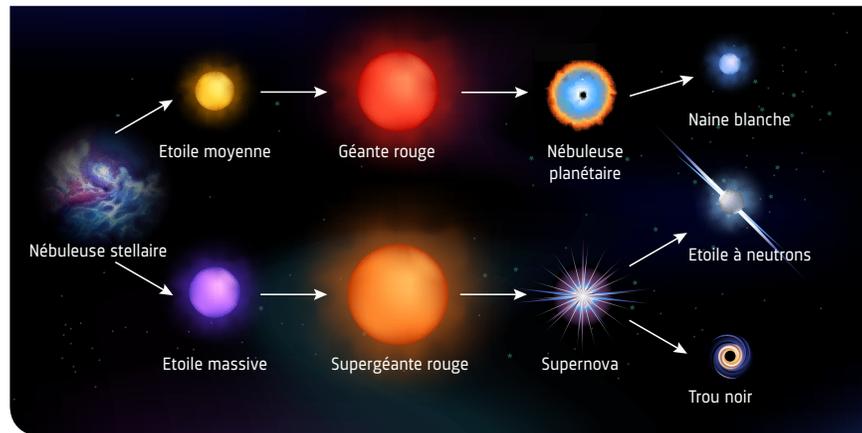


Fig. 6: Les étoiles évoluent différemment en fonction de leur masse originelle. Credit: Shutterstock

Les étoiles plus massives traversent toutes les phases restantes de la fusion nucléaire, depuis la combustion du carbone à celle du silicium. Une étoile massive grossit jusqu'à atteindre la taille d'une *supergéante* avant l'effondrement de son noyau ferreux central, puis explose et se transforme en une *supernova* en produisant une brève mais énorme *explosion* émettant une énergie aussi grande que toute une galaxie. Observé depuis la Terre, ce type d'événement, étudié en détail au moyen des télescopes de l'ESO et de l'ESA (Fig. 7) offre la possibilité de sonder la fin de vie des étoiles massives.

Premier cas de figure : la phase finale de la vie d'une étoile peut se présenter sous la forme d'une *étoile à neutrons*, un objet d'une extrême densité composé presque intégralement de neutrons et supporté par la pression quantique d'un gaz de neutrons froid et de forces nucléaires répulsives; l'observation des *neutrinos*, lesquels quittent le cœur de l'étoile de haute densité dans les quelques secondes seulement qui suivent son effondrement, a prouvé que nos connaissances de base sur les supernovas de type à effondrement de cœur étaient exactes – un sujet activement débattu au sein des équipes de chercheurs suisses. Second cas de figure : l'étoile peut disparaître sous la forme d'un *trou noir* accompagné d'autres

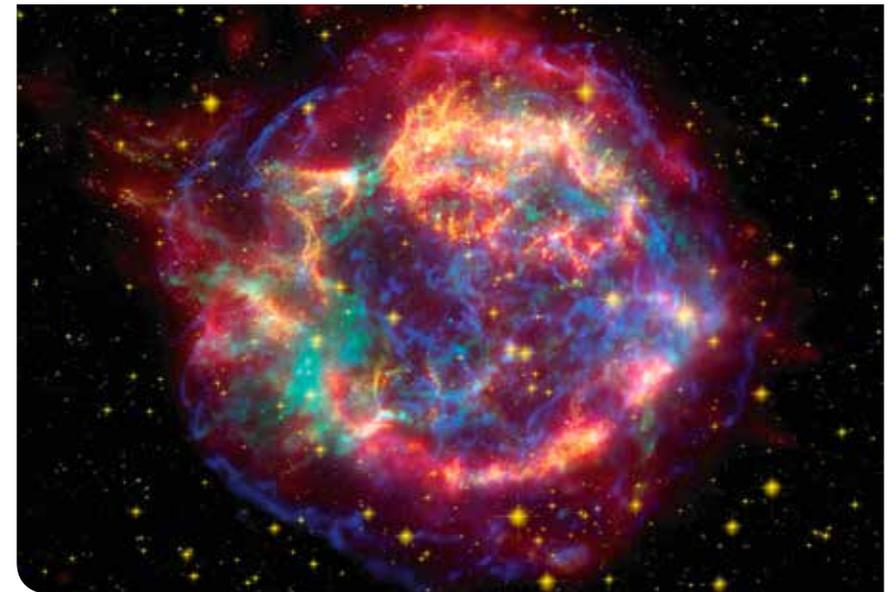


Fig. 7: CAS A, vestige d'une explosion de supernova (par effondrement du cœur) survenue il y a environ 300 ans dans la constellation de Cassiopée. Image en fausses couleurs composée de données issues de trois télescopes. En rouge, les données infrarouges du télescope spatial Spitzer (NASA); en orange, les données visibles du télescope spatial Hubble (NASA/ESA); en bleu et vert données de l'observatoire à rayons X de Chandra (NASA). Le point de couleur cyan légèrement décentré est le vestige du cœur d'une étoile devenue une étoile à neutrons fortement magnétisée. Credit: NASA/JPL-Caltech

phénomènes, tels que l'apparition d'une *hypernova* (supernova super lumineuse) et/ou d'un *sursaut gamma* (libération d'une énergie titanesque avec émission de rayons gamma). Les courbes de lumières, qui mesurent la luminosité déclinante des supernovae en fonction du temps, sont observables par le **New Technology Telescope (NTT)**, et le **VLT**, de l'ESO, et le seront par le **JWST**. Les observations sur des périodes de temps étendues requièrent un accès à des télescopes de classe 8-10 m et au télescope de très grand diamètre **ELT** pour pouvoir mener des études plus détaillées.

Lorsqu'une naine blanche a un compagnon stellaire proche et forme avec ce dernier un *système binaire*, la masse peut être transférée à un compagnon stellaire proche et forme avec ce dernier. Il en résulte que la masse de la naine blanche peut excéder un certain plafond (1,4 masses solaires) au-delà duquel une explo-

sion se déclenche, appelée *supernova de type Ia*. Parce que ces systèmes binaires peuvent être utilisés pour déterminer les distances dans l'Univers, ils ont permis de découvrir que l'*expansion de l'Univers s'accélérait* – un champ de recherche dans lequel les astronomes suisses sont très actifs.

Les systèmes binaires comportant des étoiles de neutrons peuvent conduire à un grand nombre d'autres phénomènes explosifs caractérisés par des sursauts en émission de rayonnement X et gamma, (ainsi que par l'émission d'ondes gravitationnelles, voir 4.2) observables respectivement au moyen du télescope **XMM Newton** et du satellite à rayons gamma **INTEGRAL de l'ESA**. La Suisse héberge l'**INTEGRAL Science Data Center (ISDC)**, lequel contribue également à l'heure actuelle de manière active à d'autres missions spatiales et projets au sol, avec, comme axe scientifique principal, l'astrophysique des hautes énergies.

3. Les galaxies

3.1 Formation et évolution

Les galaxies sont un ensemble d'étoiles, de gaz interstellaires, d'un trou noir supermassif généralement central (avec des masses typiques comprises entre quelques millions et quelques milliards de masses solaires) et de matière sombre – une composante fondamentale pour leurs propriétés gravitationnelles, leur formation et leur évolution. La taille des galaxies varie considérablement et chacune d'entre elles contient typiquement 100 milliards d'étoiles. La taille des galaxies elliptiques géantes peut être 100 fois plus élevée, et celle des galaxies naines peut être 10 fois plus faible.

L'étude de l'évolution des galaxies peut s'appuyer sur un phénomène astronomique connu sous le nom de *redshift*, un décalage vers le rouge de la lumière qui se produit à chaque fois qu'une source de lumière s'éloigne de l'observateur, comme cela est le cas en raison de l'expansion de l'Univers. Cette fuite provoque un décalage des longueurs d'onde de la lumière émis par cet objet en direction du rouge du spectre électromagnétique. La caractérisation de ce décalage au fil du temps peut livrer des enseignements scientifiques sur les distances et l'âge de telles sources.

Le **VLT** est voué à rester une installation de premier plan pour la conduite de ce type d'études. L'un des principaux instruments de deuxième génération du **VLT**, **MUSE**, a été mis en service récemment; il va permettre d'étudier en détail la masse et l'âge des galaxies, un domaine dont les volets clés font l'objet d'une attention particulière par les astronomes des institutions suisses. Il permettra également de mener des études pionnières sur l'évolution de la « toile cosmique », c'est-à-dire de la distribution de la matière dans l'Univers.

Une autre étape majeure sera atteinte par l'instrument **MOONS**. Ce spectrographe sensible dans le visible et le *proche infrarouge*, dont la mise en service est prévue en 2019, étudiera les galaxies lointaines en remontant le passé sur 10 milliards d'années (c'est-à-dire, sur une période couvrant la plus grande partie de l'histoire de l'Univers), et ce avec la même précision que celle obtenue aujourd'hui pour les galaxies proches. La mise à jour de **SINFONI**, qui permettra une utilisation sur une nouvelle installation d'optique adaptative (**ERIS**), fournira des spectres IR complémentaires des galaxies individuelles les plus lointaines. L'utilisation du réseau de télescopes **ALMA** (et des installations de l'**IRAM/PdB**) en tandem avec ces installations optiques/infrarouges permettront d'étudier par le menu la formation et l'évolution des galaxies.

Les astronomes travaillant au sein des institutions suisses sont également appelés à jouer un rôle important dans la mise au point d'une mission d'astrophysique à haute énergie (rayons X) de l'ESA (**ATHENA**), qui pourrait être lancée en 2028. Au cours de la prochaine décennie, cette installation est amenée à jouer un rôle majeur pour la compréhension de la coévolution des galaxies et des trous noirs.

Les compétences en infrarouge et en technologie des ondes millimétriques sont devenues de plus en plus cruciales pour établir le lien entre la formation des étoiles et l'évolution des galaxies. L'accès à des installations optiques/infrarouges comme le **VLT** et, bientôt, le **JWST** permettront aux astronomes suisses de rester à la pointe de ce domaine en plein essor. Nous pouvons capitaliser sur les succès passés des missions de l'ESA dans le domaine de l'infrarouge (p. ex. **ISO** et **Herschel**) pour préparer l'arrivée du futur **SPICA**, un satellite japonais dont le lancement est prévu en 2022.

4. L'Univers

La nature de la matière sombre et de l'énergie sombre, de même que l'*inflation* (période d'expansion extrêmement rapide correspondant aux tout premiers instants de la création de l'Univers) et la *gravitation* constituent des énigmes parmi les plus lancinantes de la cosmologie et de la physique fondamentale actuelles. Pour jeter un éclairage sur ces questions, les astronomes suisses endossent un rôle leader dans des projets internationaux majeurs, à la fois depuis l'espace et au sol. Ces projets sont de nature expérimentaux et théoriques.

4.1 Le fond diffus cosmologique

Le fond diffus cosmologique, la *première lumière* à avoir été émise environ 380 000 années après le Big Bang, nous livre une sorte de carte d'identité d'une grande précision de l'Univers primordial. La mission **Planck** de l'ESA a été lancée en 2009 pour l'étudier. En leur qualité de membres de l'équipe centrale du projet, des astrophysiciens de la Suisse ont participé aux premières publications de données scientifiques en 2013 (Fig. 8). Ces données font ressortir des tensions avec d'autres sondes ainsi que des anomalies intrigantes nécessitant des recherches plus poussées. Les mises à jour subséquentes permettront d'affiner considérablement le *modèle cosmologique standard* et de faire avancer nos connaissances de la composition de l'Univers aussi bien actuel que primordial. Les astronomes suisses sont également engagés dans des investigations théoriques de cette phase primordiale de l'Univers, en particulier à l'interface avec la physique des particules.

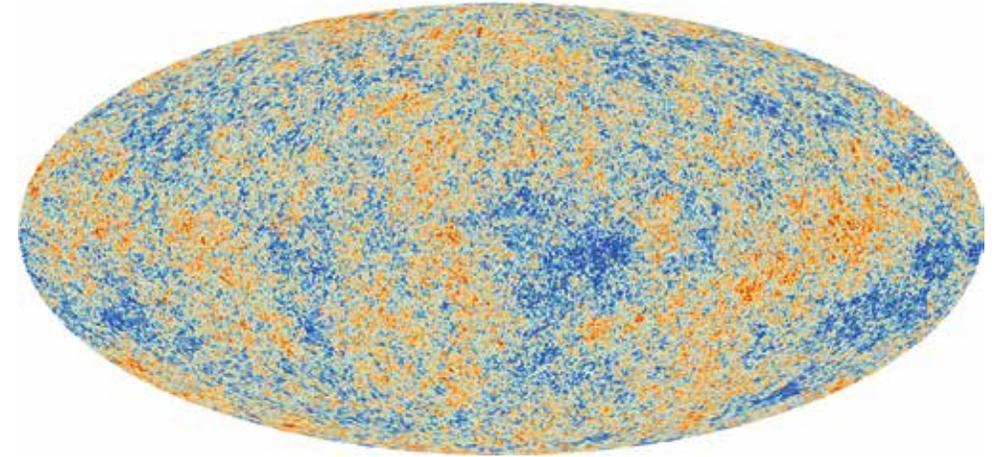


Fig. 8: Anisotropies du rayonnement cosmologique observés par le satellite **Planck** de l'ESA. Ce rayonnement émis 380 000 ans après le Big Bang montre des régions présentant de petites différences de température et de densité (différentes couleurs sur la figure). Les régions les plus denses vont donner naissance à des galaxies et à des étoiles. Crédit: ESA/The Planck Collaboration.

4.2 Tests de gravitation et ondes gravitationnelles

La *relativité générale* (RG) a été inventée en 1915 par Albert Einstein au cours de ses années passées à Berne et à Zurich. Cette théorie définit le concept des ondes gravitationnelles, des ondulations de l'espace-temps qui se propagent comme des vagues et sont produites par des événements tels que la fusion de deux objets très denses (par exemple des trous noirs ou des étoiles à neutrons). Ces *ondes gravitationnelles*, découvertes pour la première fois en 2015 par le détecteur terrestre américain **LIGO**, sont conformes aux prédictions de la théorie de la RG. Les écarts constatés par rapport à la RG pourraient être dus à la présence de la matière sombre et/ou à l'énergie sombre.

La Suisse est engagée dans la construction du satellite **LISA-Pathfinder** de l'ESA lancé en 2015, dont le but consiste à tester la faisabilité technique de la mission **LISA**. L'objectif de ce satellite est de détecter et d'étudier le rayonnement gravitationnel à basses fréquences, c'est-à-dire la perte énergétique d'objets via les ondes gravitationnelles. **LISA** ouvre tout un champ de possibles pour les études d'astrophysique en permettant la détection de trous noirs massifs à des distances cosmologiques. Son lancement (avec le soutien possible de la NASA) devrait avoir lieu dans les années 2030, voire plus tôt.

La théorie de la RG prédit également la *déflexion de la lumière par un champ gravitationnel*. Cet effet est utilisé par les astronomes en ce sens que de grands ensembles de matière peuvent agir, de façon analogue à une lentille optique, sur la lumière émise à partir d'une source lointaine. En 1937, Fritz Zwicky a souligné que cela pouvait permettre aux amas de galaxies d'agir comme des *lentilles gravitationnelles*. Il a fallu attendre 1979 pour que cet effet, désormais connu sous le nom de « lentille gravitationnelle forte » (séparation d'une seule source en plusieurs images) soit confirmé par l'observation. A l'heure actuelle, les scientifiques maximisent les opportunités offertes par les effets de « lentille faible » (déformation de la source en une seule image allongée), qui modifient de manière statistique la distribution des formes des images d'un ensemble de galaxies d'arrière-plan.

4.3 Exploration des grandes structures

La notion de *grande structure* (*Large Scale Structure, LSS*) de l'Univers désigne les structures existant à des échelles beaucoup plus grandes que les galaxies individuelles. Ces LSS, qui peuvent être observées jusqu'à des distances de plusieurs milliards d'années-lumière, sont créées et formées par la gravitation. Leur étude, qui livre des enseignements complémentaires sur l'Univers primordial au travers du CMB, est essentielle pour comprendre la période dominée par l'énergie sombre. Ces mesures sont obtenues à partir d'études par imagerie et spectroscopie à grands champs dans le cadre de sondages dans les spectres visible, proche infrarouge et radio.

Les astrophysiciens suisses jouent un rôle clé dans l'étude des LSS. Depuis peu, leur équipe est membre à part entière de l'expérimentation **Dark Energy Survey (DES)** d'une durée de cinq ans, menée sur le site du télescope Blanco de 4 m de diamètre du Cerro Tololo, au Chili. Le projet **DES** pour étudier l'énergie sombre va collecter des images sur une surface du ciel de 5000 degrés carrés dans cinq bandes spectrales visibles; il est optimisé pour l'étude des lentilles faibles. Les scientifiques suisses sont également engagés dans le projet **Baryonic Oscillations Spectroscopy Survey (BOSS)**, dont ils dirigent l'extension **eBOSS**; les *oscillations acoustiques baryoniques (BAO)* sont des fluctuations de la densité de la matière visible de l'Univers. Ils sont également à l'origine du projet **COSMOGRAIL** qu'ils dirigent: l'idée de cette collaboration internationale est de suivre sur de longues périodes de temps des objets célestes appelés *quasars* et dont la lumière a été déviée par l'effet de lentille gravitationnelle. Ces travaux sont réalisés essentiellement sur le télescope suisse **Euler** de l'observatoire de l'ESO de La Silla, au Chili.

Les scientifiques suisses travaillent également au développement de futurs projets d'observation à grande échelle. Le **Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI)** sera un puissant spectographe multi-objets capable de mesurer les positions et le redshift de dizaines de millions de galaxies. La Suisse est impliquée de même dans le développement d'expérimentations sur le fond radio cosmologique, comme le projet **BINGO**, optimisé pour mesurer les oscillations acoustiques baryoniques. La participation de plusieurs groupes suisses au projet de télescope **Large Synoptic Survey Telescope (LSST)** dirigé par les Etats-Unis et dont le démarrage opérationnel est prévu en 2022 sur le site de Cerro Pachon au Chili, garantira un accès aux plus précieuses des données au sol jamais collectées.

Autre engagement, et non des moindres, un grand nombre d'institutions suisses sont largement impliquées dans la préparation du satellite **Euclid** de l'ESA qui s'apprête à explorer la nature de l'énergie sombre et la distribution à grande échelle de la matière sombre. Ces institutions endossent des responsabilités de premier plan dans les domaines suivants: théorie, observations, simulations, traitement des signaux, réduction des données, instrumentation et hébergement de l'un des Science Data Centers (SDC). Au cours de la période 2020–2026, ce centre générera les données spatiales les plus performantes pour la cosmologie et l'astrophysique extragalactique.

4.4 Square Kilometer Array

Potentiellement le plus grand projet de collaboration internationale dans le domaine de l'astronomie, le **Square Kilometre Array (SKA)** est un projet destiné à construire le plus grand télescope radio du monde avec, à la clé, une zone de collecte carrée d'un kilomètre de côté équivalente à un million de mètres carrés. Le SKA utilisera des milliers de récepteurs paraboliques et, en phase finale, jusqu'à un million d'antennes. L'envergure du projet SKA représente un grand bond en avant en matière d'ingénierie et de R&D. L'Afrique du Sud et l'Australie occidentale ont été choisies pour cohéberger le projet pour des raisons scientifiques et techniques, l'une d'entre elles étant le silence des ondes radio régnant sur ces deux sites terrestres très éloignés de lieux développés.

Le SKA vise à répondre à certaines des plus grandes énigmes de l'astronomie. La sensibilité sans précédent de milliers de récepteurs radio individuels fonctionnant en synergie offrira aux astronomes un éclairage sur la formation et l'évolution des premières étoiles et galaxies nées après le Big Bang. Ces récepteurs aideront en outre à faire la lumière sur la formation des premiers trous noirs et

des premières étoiles, sur le rôle du magnétisme cosmique, sur la nature de la gravitation, sur la nature de l'énergie sombre, et sur la possibilité de formes de vie extra-terrestres. Le SKA aura des incidences sur tous les domaines de l'astrophysique et de la cosmologie.

Les astronomes suisses manifestent un grand intérêt pour un engagement fort dans le projet SKA sur les fronts scientifiques et technologique. A l'heure actuelle, la Suisse jouit d'un statut d'observateur. Toutefois, des universités examinent, aux côtés du Secrétariat d'Etat à la formation, à la recherche et à l'innovation (SEFRI), la possibilité d'une participation plus concrète.

5. Liens avec des champs de recherche adjacents

Dans l'astronomie classique, des instruments d'observation ont été imaginés pour capter le rayonnement électromagnétique de toutes les longueurs d'onde montrées en Figure 1. Ce document discute une nouvelle extension du domaine observable, celui des ondes gravitationnelles. La récente détection de la fusion de deux étoiles à neutrons (GW179817) marque l'entrée dans une nouvelle ère, celle de l'astronomie multi-messagers, incluant les ondes gravitationnelles et les rayonnements gamma, X, optique, infra-rouge, radio (avec des implications de chercheurs en Suisse dans la modélisation, la collaboration LIGO pour la détection des ondes gravitationnelles, et les observations à hautes énergies avec le satellite INTEGRAL). Le Soleil et la supernova 1987A ont aussi été observés au travers de leurs émissions de neutrinos, et de futures détections de fusion d'étoiles à neutrons pourront probablement aussi être détectées au travers de leurs émissions de neutrinos. Des champs de recherches voisins, comme la physique des *astroparticules*, peuvent par conséquent contribuer à notre compréhension des objets astrophysiques et à l'Univers en général. Ces projets portent notamment sur l'observation des *neutrinos* (p. ex. ICECUBE), des *rayons cosmiques à haute énergie* (p. ex. AMS) ou encore des *rayons gamma à très haute énergie* (p. ex. CTA). Des descriptions de ces outils sont disponibles dans la Feuille de route suisse pour la physique des particules et ses mises à jour.⁴

6. Conclusions

Comme nous l'avons déjà évoqué dans le résumé, les astronomes suisses peuvent se targuer de très grands succès dans leurs travaux à la pointe de la recherche astrophysique mondiale. **S'ils sont en mesure d'afficher de telles réussites, c'est essentiellement parce que la Suisse participe et contribue à des coopérations et organisations européennes (et internationales), ce qui leur donne accès à des infrastructures d'observation de très grande échelle et qualité, au sol comme dans l'espace, qu'aucun pays ne pourrait financer et gérer seul.**

⁴ https://naturwissenschaften.ch/organisations/chipp/meetings_documentation/95387-chipp-roadmap-achievements-status-and-outlook-implementation-of-the-road-map-2005-2010

Annexe

Liste des satellites et télescopes astronomiques, des études observationnelles, des coopérations dans le domaine de l'observation et des abréviations utilisées dans le document :

Statut : a = achevé ; c = en cours, p = en préparation/en cours de construction

Jaune = infrastructure au sol ; bleu = instruments et exploration depuis l'espace

ALMA : le grand projet de collaboration entre l'ESO, les Etats-Unis et le Japon baptisé « Atacama Large Millimeter Array » (ALMA) a construit et maintenant exploite un réseau de 66 antennes à ondes millimétriques jusqu'à 12 m de diamètre, répartis sur une surface de 200 km ² sur le plateau chilien de Chajnantor, à une altitude de 5000 mètres. La construction du projet s'est achevée en 2012.	c	CoRoT : cette mission de l'ESA baptisée « Convection, Rotation and planetary Transits » (CoRoT), opérationnelle entre 2006 et 2013, a été en mesure de sonder les intérieurs stellaires, notamment par l'étude des ondes acoustiques ondulant à la surface des étoiles (astérosismologie).	a
AMS : le Spectromètre magnétique Alpha (AMS) est un détecteur de physique des particules installé sur un module externe arrimé à la Station spatiale internationale (ISS) dont l'objectif est la recherche de matière sombre et d'antimatière. Il effectue des mesures de précision sur la composition et le flux des rayons cosmiques.	c	COSMOGRAIL : l'objectif du projet COSMOGRAIL (COSmological MONitoring of GRAVitational Lenses) est la mesure des retards temporels de la plupart des images de quasars subissant l'effet de lentille gravitationnelle, avec une précision inférieure à 3%, ce afin de déterminer la constante de Hubble H ₀ .	c
ATHENA : l'Advanced Telescope for High ENergy Astrophysics (ATHENA) de l'ESA aura pour mission d'étudier les environnements chauds et énergétiques au cours de la formation de structure à grande échelle de l'Univers et de la formation et de la croissance des trous noirs.	p	CTA : le CTA (Cerenkov Telescope Array) ou « Réseau de télescopes Tcherenkov » est une expérience d'astroparticules visant à mesurer les rayons gamma des plus hautes énergies.	p
BINGO : le projet d'observation des oscillations acoustiques baryoniques en gaz neutre « Baryon acoustic oscillations In Neutral Gas Observations » (BINGO) est une coopération entre des groupes de recherche du Royaume-Uni, de la Suisse, du Brésil, de l'Uruguay et de l'Arabie saoudite.	p	DES : le DES ou Dark Energy Survey (« Etude de l'énergie sombre ») est un programme de sondage de l'Univers par la collecte d'images du ciel sur une surface de 5 000 degrés carrés.	c
BOSS : cette étude (à l'aide du télescope de 2,5 m à Apache Point, USA) a pour but de cartographier l'Univers aux échelles les plus grandes, afin de créer la plus grande représentation graphique en 3D des galaxies jamais réalisée.	c	DESI : le Dark Energy Spectroscopic Instrument sert à mesurer les oscillations acoustiques baryoniques ainsi que les distorsions spatiales du décalage vers le rouge (redshift).	p
CHEOPS : CHaracterising ExOPlanet Satellite (CHEOPS) est la première mission de petite envergure du programme scientifique de l'ESA consacré à l'étude du transit des exoplanètes au moyen de la photométrie de haute précision; ce projet est codirigé par l'ESA et la Suisse.	p	eBOSS : l'objectif de l'Extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey (eBOSS) est la mesure exacte de l'histoire de l'expansion de l'Univers (80% de son histoire depuis ses origines), en remontant à la période où l'Univers avait moins de trois milliards d'années, et d'affiner ainsi les connaissances sur la nature de l'énergie sombre.	c
COBE : l'objectif de la mission COsmic Background Explorer mission (COBE) menée par la NASA de 1989 et 1993, le premier de trois satellites consacrés à l'étude du fonds diffus cosmologique (CMB), était de recueillir des mesures précises du rayonnement diffuse comprises entre 1 micromètre et 1 centimètre sur toute la sphère spatiale; ses conclusions ont été couronnées par le prix Nobel de physique de 2006.	a	ELT : le Extremely Large Telescope, un télescope optique-infrarouge d'un diamètre de 39 m, constitue la priorité de l'ESO à court et moyens termes, après l'achèvement du projet ALMA.	p
		ERIS : le Enhanced Resolution Imager and Spectrograph est un spectro-imageur haute résolution destiné au ESO VLT.	p
		ESPRESSO : spectrographe optique haute résolution superstable pour le foyer coudé combiné des quatre unités du ESO VLT.	p
		Euclid : mission spatiale de l'ESA, supérieure en surface et en qualité aux missions similaires à partir du sol, destinée à cartographier la géométrie de la matière sombre de l'Univers par l'étude de la relation entre la distance et le décalage vers le rouge (redshift) et l'évolution cosmique, ceci jusqu'à des redshifts ~2, c'est-à-dire l'équivalent d'un « look-back time » (« temps de retour en arrière ») d'environ 10 milliards d'années.	p

Euler Telescope: le télescope suisse Leonhard Euler d'un diamètre de 1,2 m est installé sur le site de La Silla de l'ESO; il a été construit et est exploité par l'Observatoire de Genève.	c
ExoMars: mission exobiologique vers Mars.	c
Gaia: mission de l'ESA dont le but est de recueillir des positions et des relevés photométriques extrêmement précis d'environ 1 milliard d'étoiles de notre Galaxie.	c
HARPS: High Accuracy Radial velocity Planet Searcher – spectromètre de ultra-haute précision opérationnel sur le télescope de 3,6 m de l'ESO.	c
Télescope spatial Herschel: ce télescope de l'ESA doté d'un miroir de 3,5 m de diamètre a pour mission de capter le rayonnement à grandes longueurs d'ondes émis par les objets les plus froids et les plus lointains de l'Univers. Herschel est le seul observatoire spatial capable de couvrir une plage spectrale allant de l'infrarouge lointain au submillimétrique.	a
HIPPARCOS: satellite scientifique de l'ESA lancé en 1989 et exploité jusqu'en 1993. Ce fut la première expérience spatiale consacrée à l'astrométrie de précision pour la mesure de parallaxes de haute précision de plus de 100 000 étoiles.	a
HST: ce télescope spatial orbital de 2,5 m de diamètre baptisé « Hubble » construit par la NASA et l'ESA est en exploitation depuis 1990.	o
IceCube: ce détecteur d'astro-particules implanté au pôle Sud explore les neutrinos émis par les sources astrophysiques les plus violentes du cosmos.	c
Integral: l'observatoire à rayons X et rayons gamma haute énergie de l'ESA.	c
IRAM: l'Institut de radioastronomie millimétrique est fruit d'une collaboration internationale entre la France, l'Allemagne (via le Max Planck Institut) et l'Espagne. Il compte parmi les partenaires majeurs d'ALMA.	c
ISO: l'Infrared Space Observatory de l'ESA fut le premier observatoire infrarouge orbital de l'histoire (1995-2006).	a
JUICE: le Jupiter ICy moons Explorer (JUICE) est une mission de l'ESA pour l'exploration des lunes de Jupiter. Lancement prévu en 2022.	p
JWST: le successeur du HST (mais aussi du télescope spatial Spitzer) de 6,5 m de diamètre doit être lancé en 2018. Le JWST fonctionnera principalement dans la bande spectrale comprise entre 1 et 28 μm .	p
KEPLER: cette mission de la NASA a pour objet d'explorer la structure et la diversité des systèmes planétaires extrasolaires. Elle consiste à observer un vaste échantillon d'étoiles et leurs variations.	c

LISA: Laser Interferometer Space Antenna: est une future mission spatiale de l'Agence spatiale européenne (ESA) dont l'objectif est de détecter des ondes gravitationnelles de basse fréquence depuis l'espace	p
LISA-Pathfinder: ce programme de démonstration technologique conduit par l'ESA en vue de préparer la mission LISA. Cette mission a été lancée en 2015.	c
LSST: le Large Synoptic Survey Telescope est un télescope d'étude rapide à champ large et à grande ouverture destiné à collecter des images d'objets faiblement lumineux dans tout le ciel.	p
MIRI: le Mid-InfraRed Imager est un instrument construit pour le JWST par un consortium entre l'Europe et les Etats-Unis, qui intervient dans la bande spectrale comprise entre 5 et 28 μm et réalise des relevés d'imagerie et de spectrographie.	p
MOONS: nouveau concept de design pour un spectrographe multi-objets optique et proche infrarouge destiné au VLT. L'objectif est qu'il soit opérationnel d'ici 2019.	p
MUSE: le Multi-Unit Spectroscopic Explorer est un instrument de deuxième génération destiné au VLT de l'ESO; il consiste en un spectrographe à champ intégral de 90 000 canaux.	c
NGTS: le Next Generation Transit Survey consiste en un réseau de petits télescopes robotiques installés à l'observatoire du Cerro Paranal, au Chili.	c
NORSAT-1: ce petit satellite norvégien sert à étudier le rayonnement solaire, la météo de l'espace et le trafic des navires. Il fut lancé en 2015.	c
NTT: ce télescope Ritchey-Chretien de 3,58 m de diamètre exploité par l'ESO fut le pionnier de l'utilisation des optiques actives.	b
PLATO: l'objectif de la mission PLANetary Transits and Oscillations of stars (PLATO) de l'ESA est la mesure des transits planétaires et des oscillations stellaires. Lancement prévu en 2024.	p
PLANCK: observatoire spatial de l'ESA ayant permis de cartographier, entre 2009 et 2013, les anisotropies du fond diffus cosmologique (CMB) à des fréquences micro-onde et infrarouge. Avec sa sensibilité élevée et sa résolution angulaire améliorée, la mission a permis d'améliorer considérablement les observations faites par les instruments COBE et WMAP de la NASA.	a
Proba-3: mission de l'ESA pour démontrer le vol en formation dans l'espace. Deux satellites couplés formeront un coronographe solaire de 150 m de long. Lancement prévu en 2018.	p
Rosetta: cette mission de l'ESA a rencontré en 2014 une comète qu'elle a suivie pour étudier l'évolution de ses propriétés physiques au cours de son orbite.	a

SINFONI: le Spectrograph for INtegral Field Observations in the Near Infrared (Spectrographe pour des observations en proche infrarouge) est rattaché au VLT de l'ESO.	c
SKA: Square Kilometer Array est le nom d'un projet international visant à construire le plus grand télescope radio du monde, d'une surface collectrice totale d'un kilomètre carré.	p
Solar Orbiter: mission de l'ESA consacrée à la physique solaire. Lancement prévu en 2018.	p
SPICA: ce télescope spatial infrarouge pour la cosmologie et l'astrophysique est un programme japonais dont le lancement est prévu en 2022.	p
Spitzer: observatoire infrarouge de la NASA.	c
SPHERE: cet instrument de deuxième génération destiné au VLT de l'ESO a été conçu pour la détection de grosses planètes semblables à Jupiter en orbite autour d'étoiles proches.	c
VLT: le Very Large Telescope regroupe les quatre télescopes de 8,2 m de diamètre exploités par l'ESO à l'observatoire du Cerro Paranal, au Chili.	c
VLTI: le Very Large Telescope Interferometer comprend les quatre télescopes du VLT couplés aux quatre télescopes auxiliaires, tous reliés entre eux par interférométrie de manière à offrir une résolution spatiale exceptionnellement élevée des sources lumineuses observées.	c
WMAP: la sonde Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (NASA, 2001-2009) a permis d'améliorer considérablement les connaissances sur le CMB au-delà des enseignements de la mission précédente COBE, ce grâce à des observations d'une résolution spatiale 20 fois supérieure.	a
XMM Newton: la mission X-ray Multi-Mirror de l'ESA lancée en 1999 regroupe trois télescopes à rayon X à haut rendement. Sa surface collectrice, d'un rendement sans précédent, et sa capacité à produire de longues expositions ininterrompues permettent d'obtenir des observations à haute sensibilité.	c

Qui sommes-nous ?

Les Académies suisses des sciences mettent les sciences en réseau sur le plan régional, national et international. Elles s'engagent particulièrement dans les domaines de la reconnaissance précoce, de l'éthique et du dialogue entre science et société.

Les Académies suisses des sciences regroupant les quatre académies scientifiques suisses:

- Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT)
- Académie suisse des sciences médicales (ASSM)
- Académie suisse des sciences humaines et sociales (ASSH)
- Académie suisse des sciences techniques (SATW)

ainsi que les centres de compétences

- Centre d'évaluation des choix technologiques (TA-SWISS)
- Fondation Science et Cité

SCNAT – un savoir en réseau au service de la société

Forte de ses 35 000 expertes et experts, l'Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT) s'engage à l'échelle régionale, nationale et internationale pour l'avenir de la science et de la société. Elle renforce la prise de conscience à l'égard des sciences naturelles afin que celles-ci deviennent un pilier central de notre développement culturel et économique. Sa large implantation dans le milieu scientifique en fait un partenaire représentatif pour la politique. La SCNAT œuvre à la mise en réseau des sciences, met son expertise à disposition, encourage le dialogue entre la science et la société, identifie et évalue les progrès scientifiques de manière à construire et à renforcer les bases de travail de la prochaine génération de chercheuses et de chercheurs. Elle fait partie des Académies suisses des sciences.